

Figura 1. Composición coloreada de los canales en torno a $1.6\mu\text{m}$, $0.8\mu\text{m}$ y $0.6\mu\text{m}$ mostrando nubes de topos engelados (en turquesa) y líquidos (en blanco).

...yet from those flames no light but rather darkness visible” *John Milton, Paradise Lost.*

Las rutas del sol

ALGUNAS APLICACIONES DE LOS CANALES SOLARES DE METEOSAT

POR JOSÉ IGNACIO PRIETO

Meteosat es un poderoso instrumento de teledetección y análisis meteorológico de la atmósfera. Con igual valor sirve al estudio del suelo terrestre, e incluso de la superficie oceánica. En este resumen revisamos algunos usos de los canales solares integrados en su instrumento SEVIRI y en otras plataformas meteorológicas, cuando faltan pocos años para el advenimiento de una nueva generación de sensores. Nos dejaremos guiar por el sol.

Un vistazo a la luz

La radiación solar reflejada por la tierra hacia los satélites meteorológicos es visible al ojo humano sólo parcialmente. Nuestro órgano visual responde a radiación de entre $0,4$ y $0,75\mu\text{m}$, pero no es sensible a $0,8$ micras, un canal tan reconocido en análisis de vegetación como el centrado en $0,6$ micras. Menos aún reacciona nuestro ojo a radiación de $1,6$ micras próxima al infrarrojo, generada casi en exclusiva por el sol. La radiación en las tres longitudes mencionadas de Meteosat es de origen solar.

Modis es el nombre de un respetado instrumento a bordo de las plataformas Terra y Aqua, satélites de la NASA en órbita cuasipolar. Incluye canales centrados en $0,4$, $0,5$ y $0,6$ micras, entre otros muchos. Como esas longitudes reproducen la sensibilidad al color de los conos en nuestra retina, su

superposición semeja lo que veríamos si estuviéramos subidos al satélite. Aguardaremos a la tercera generación de Meteosat en 2020 para ver imágenes en color *verdadero* desde la órbita geoestacionaria. Por el momento es posible construir falso color a partir de los tres canales solares de Meteosat, como explicamos luego.

Colores y propiedades

Es normal interpretar el color como propiedad física de un material, similar a sus dimensiones espaciales, su masa o su estructura. En la oscuridad, consideramos que nuestro despertador sigue siendo tan amarillo como a la luz del día, con independencia de que lo veamos o no. Le hemos cedido graciosamente a su superficie la propiedad del color. Su superficie refleja más unas longitudes de onda que otras, y en ese

Las rutas del sol

sentido tiene un perfil de reflectividad. Pero su color dependerá también de la iluminación externa. La iluminación de la tierra por el sol cambia con la hora y el día, aparte de las variaciones debidas a nubes o turbidez atmosférica. No hay dos condiciones de iluminación iguales, y por tanto es difícil estudiar la evolución de los suelos. Caracterizar bien la iluminación es una parte esencial de los modelos de insolación.

La segunda generación de Meteosat, con sus once canales síncronos y las mismas características de resolución, ha permitido el uso de múltiples productos coloreados en la rutina meteorológica. El más sencillo y conocido es la composición llamada natural, resultado de usar 1.6µm, 0.8µm y 0.6µm como fuentes de rojo, verde y azul, respectivamente. Otros integran diferencias entre canales parecidos entre sí dentro del dominio infrarrojo, como el compuesto coloreado etiquetado en Europa *polvo*, por el característico tono morado con que aparecen en dicho compuesto las tormentas de arena y polvo. El producto *masas de aire*, integrando los canales de fuerte absorción por vapor de agua, resume las características de humedad y estabilidad. Con la técnica RGB una imagen en color puede estar compuesta con tres o más canales, resumiendo características de las nubes o el suelo en una sola impresión visual. El ejemplo de la figura 1 muestra la distinción entre nubes con cristales de hielo, que aparecen en turquesa, y nubes líquidas, en blanco. La diferencia cromática se debe a la eficacia de los cristales en absorber la luz solar en torno a 1.6 µm. También la nieve sobre las montañas tiene la misma propiedad y aparece turquesa, como en los Alpes.

¿Llueve ahí abajo?

La reflectividad y albedo de las nubes es una función también de la superficie de las gotitas o cristales de hielo que la constituyen y en la que se refleja la luz solar hacia el satélite. Como una misma cantidad de agua en gotas pequeñas presenta más superficie que en gotas grandes, el albedo de las nubes es un índice muy pobre de la cantidad de precipitación, que resulta de la presencia de gotas grandes. Esto es una limitación general del uso de satélites en estimar precipitación, que sólo el dominio de las microondas permite en

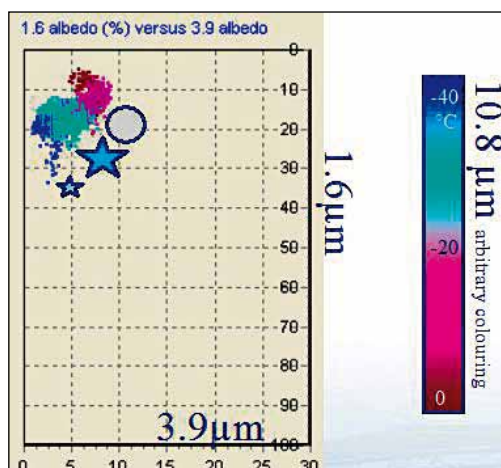


Figura 2. Diagrama de comparación de reflectividades en los canales 1.6µm y 3.9µm (cálculo apoyado en el canal 10.8µm) para la fase de crecimiento de un sistema convectivo.

alguna medida sortear. Los radares, desde el suelo, aportan una mejor estimación.

Los perfiles de reflectividad en las longitudes de onda en torno a 1,6 y 3,9 µm fundamentan una técnica para clasificar la fase de los desarrollos convectivos. Mientras que la fase de crecimiento favorece los pequeños cristales en los topes de la nube, pobres en contenido líquido, la fase de disolución presenta una mezcla más equilibrada de fases líquida y sólida en los topes, que se traduce en una correlación alta y positiva de reflectividades. Las aplicaciones de los satélites surgen también cuando los programas satelitarios han superado su ecuador, como es el caso de la segunda generación de Meteosat.

A ras de suelo

Fuera del análisis de nubosidad, la aplicación más publicitada de los canales solares es el estudio del terreno, y sobre

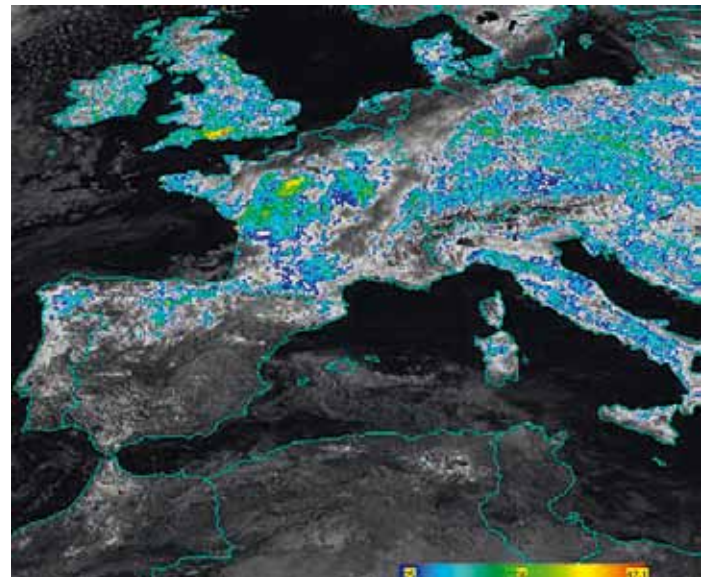


Figura 3. Imagen diferencia de albedos entre sus valores en torno a 0.8µm y a 0.6µm. Los valores altos de la diferencia por encima de 25% son coloreados para destacar vegetación en crecimiento o actividad clorofílica (en amarillo y rojo, como al sur de Inglaterra)

todo, la evolución de los cultivos en el curso del año. La fórmula más sencilla para indicar vegetación se sirve de la propiedad de clorofila y caroteno de absorber luz solar en torno a 0.6µm, pero no en torno a 0.8µm, cuando el suelo vegetado muestra mucha más reflectividad. En comparación con suelos secos, más reflectantes, las reflectividades de la vegetación se traducen en valores altos del índice normalizado. Una alternativa sencilla en cuanto a visualización de vegetación en crecimiento es el ejemplo mostrado en la figura 3 (a las 9:30 UTC del 9 de mayo 2011), donde las zonas nubosas de la imagen, que no permiten explorar el suelo, aparecen como diferencias cortas en grises oscuros, mientras las zonas despejadas, con diferencias altas, entre 25% y 50%, aparecen resaltadas en color. En este campo de los análisis

de suelos, sorprende el poco uso en los estudios edafológicos del canal $1.6\mu\text{m}$, que separa de otra manera suelos vegetales de suelos áridos por diferencia con el canal en torno a $0.8\mu\text{m}$ (canal presente en Meteosat y en el instrumento imaginador AVHRR).

Las nubes

En las nubes, la radiación solar de onda más corta penetra mejor entre las gotas o cristales de hielo. La radiación de $0.8\mu\text{m}$ presenta entonces más albedo que la de $0.6\mu\text{m}$. Pero sobre tierra, muy reflectante en $0.8\mu\text{m}$, es preferible el canal $0.6\mu\text{m}$ para detectar cirros o nubes finas por contraste con el suelo poco brillante (aún mejores que los solares son los canales infrarrojos, pues el calor radiado es muy absorbido por nubes finas, que actúan a modo de cobertores o mantas de la superficie terrestre, reteniendo su calor). Las medidas más habituales de albedo solar del satélite Meteosat son simples de calcular pero erróneas. En esquema, la energía que alcanza el sensor depende del ángulo solar azimutal, esto es, de la iluminación del pixel. También depende del albedo mismo, variable con la longitud de onda. Y por fin del ángulo que forma el satélite con el pixel, esto es, lo centrado que está el pixel en el campo visual de Meteosat. Esta última dependencia significa que las mismas condiciones de iluminación y albedo retornan un albedo mayor para un pixel periférico que para un pixel céntrico en la imagen. La figura 4 siguiente ayuda a comprender los problemas de tomar la hipótesis Lambert (flechas grises para la cantidad

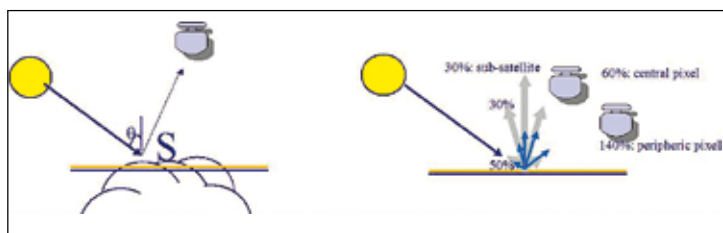


Figura 4. Esquema de la dispersión de radiación solar (el sol es el círculo amarillo) por una superficie nubosa (izquierda). La dependencia de la iluminación es previsible. Las medidas más simples de albedo suponen que la dispersión responde al modelo de Lambert, con una dependencia angular sencilla. En superficies especulares los problemas son evidentes (derecha).

de reflexión según dirección) como referencia para la dispersión real por nubes (flechas azules).

Un elemento importante de la explicación es la direccionalidad de la radiación reflejada. Sobre una superficie casi plana, como puede ser el océano en calma, los rayos de luz se comportarán según la ley de Snell de igualdad de ángulos de incidencia y reflexión, privilegiando una dirección específica. Sobre una superficie muy rugosa, la pauta que me-

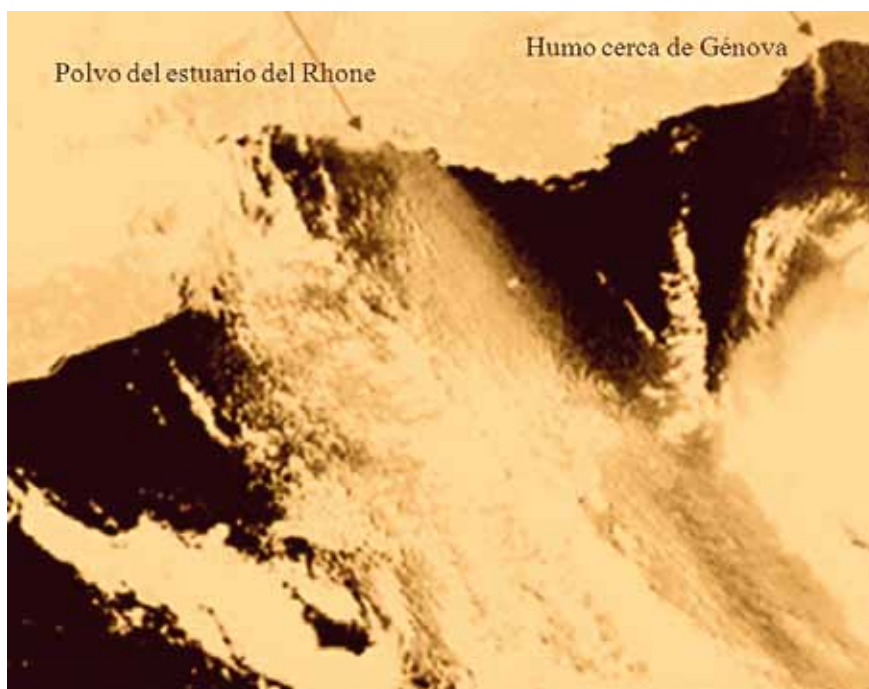


Figura 5. El viento mistral arrastra hacia el mar polvo, que promueve la condensación cuando entra en el Mediterráneo, con incremento de reflectividad en los canales solares.

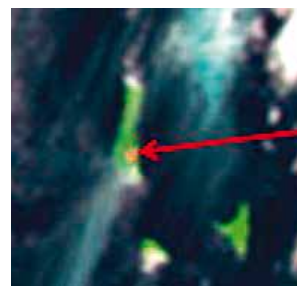


Figura 6. Lava volcánica del volcán Karthala, en los píxeles de color naranja, detectada en $1.6\mu\text{m}$ a través de la radiación que emite, no por la que refleja.

mejor describe la dirección de lo reflejado es la ley de Lambert, que calcula la radiación dispersada por el pixel como si procediera de todas las direcciones por igual. La dispersión real es intermedia entre los modelos de Snell y Lambert. La luna se aproxima al modelo de Lambert, y en su fase plena da la impresión de brillar lo mismo en su centro que cerca del contorno. También es el caso de un océano agitado por el viento. Aquí las facetas de las olas dispersan la luz casi por igual en todas las direcciones, si bien favorecen ligeramente la opuesta a la de incidencia. El viento incrementa el reflejo solar no sólo por la agitación o grosor del mar, sino también por la aparición de espuma blanca. También el viento puede arrastrar polvo de la costa próxima, como hace el Mistral, e incrementar la reflectividad superficial. En la zona de salida de los vientos del Estrecho pueden sumarse estos efectos a la condensación de vapor en gotitas en áreas de ascencias.

Humo, ceniza, polvo

Los canales solares aprovechan, sobre todo en áreas periféricas de la cobertura geográfica de Meteosat, las condiciones que favorecen la dispersión hacia adelante (por ejemplo, salidas del sol en el Este o puestas en el Oeste) para identificar la extensión de nubes de aerosol procedentes de volca-

Las rutas del sol

nes, fuego o viento sobre áreas secas. El ejemplo de la época de agosto en Bolivia, en la figura 7, muestra casi todo el continente sudamericano invadido por humo, que permanece en el aire durante semanas, a consecuencia de la quema de rastrojo en más de 25.000 puntos, según mediciones radiativas por otros satélites con mejor resolución horizontal que Meteosat. El canal en torno a $3.9\mu\text{m}$ sirve para detectar esos focos de calor por su alta temperatura, siquiera sea en una fracción del pixel. Pero las longitudes de onda más cortas del espectro solar dan idea del tamaño de las partículas en suspensión. También la lava volcánica genera valores altos de radiación por emisión en el canal $1.6\mu\text{m}$, que es de origen terrestre en la imagen de la figura 6, y procede del volcán Kar-

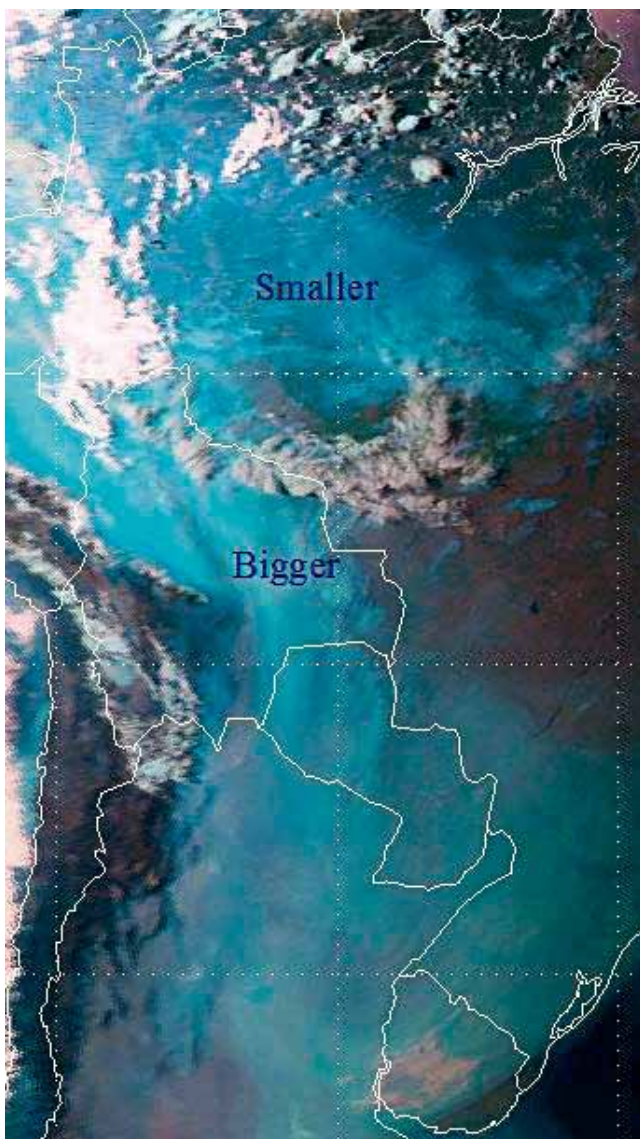


Figura 7. Meteosat-9, 2010-08-21 1015 UTC
Una gran nube de humo generada principalmente en Bolivia (donde se encuentran las partículas de humo mayores) cubre el continente sudamericano. Las partículas más pequeñas al noroeste de Brasil inducen una tonalidad más oscura en el compuesto coloreado, debida a la fuerte dispersión hacia adelante en el canal $0.6\mu\text{m}$, responsable de la componente azul.

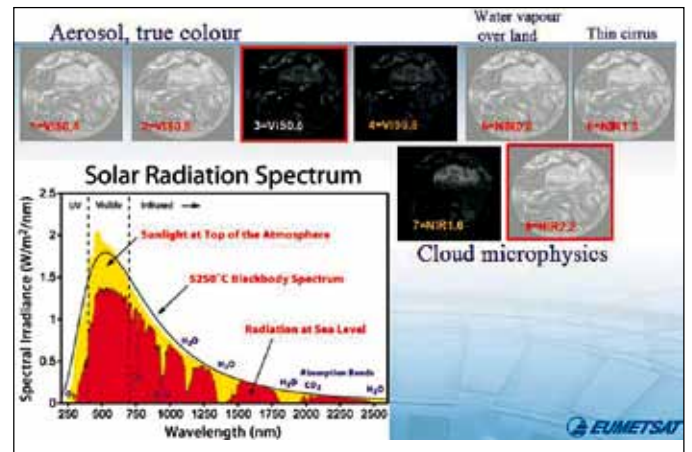


Figura 8. Las longitudes de onda cubiertas por los canales solares a bordo de la tercera generación de Meteosat, a partir de 2020. También la humedad será detectable desde el espacio en la radiación solar.

thala. Los grandes incendios forestales tienen respuesta en este canal $1.6\mu\text{m}$ durante la noche, cuando destacan sobre el ruido del sensor. No así durante el día, cuando los incendios quedan tapados por la radiación reflejada.

Luz, más luz

La tercera generación de Meteosat prevista para finales de esta década duplica en número los canales solares de SEVIRI. Serán ocho los que permitan explorar sobre tierra la concentración de vapor de agua o cirros y recuperar características del aerosol atmosférico, gracias a nuevos canales en torno a 2.2 , 1.3 , 0.9 , 0.5 y $0.4\mu\text{m}$. La figura 8 detalla sus aplicaciones y la presencia de líneas de absorción de las moléculas de vapor de agua y dióxido de carbono cerca de los nuevos canales. La absorción de radiación solar por esos gases reduce la señal reflejada por el suelo que alcanza los sensores, dejando a oscuras las zonas húmedas de la alta troposfera. En oscuridad visible.

Otras lecturas en la red

- http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD05_L2/index.html
sobre la estimación de vapor de agua con ayuda de canales solares en bandas de absorción
- http://www.eumetsat.int/groups/pps/documents/document/pdf_mtg_rep21.pdf
sobre los futuros canales solares, ya existentes en otras plataformas que Meteosat, para el lector avezado.